

KIERRÄTYSPUUN KOSTEUDEN VAIKUTUS MONIKERROSLIIMALEVYN RAKENTEISSA

Kosteuden vaikutus liimasauman lujuusominaisuuksiin

Tiivistelmä

Tekijä(t) Härmä, Henrik	Julkaisun laji Opinnäytetyö, AMK	Valmistumisaika Kevät 2020
	Sivumäärä 25	
Työn nimi Kierrätyspuun kosteuden vaikutus monikerrosliimalevyn rakenteissa Kosteuden vaikutus liimasauman lujuusominaisuuksiin		
Tutkinto Insinööri (AMK)		
<p>Tiivistelmä</p> <p>Opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää, kuinka kierrätyspuuta voitaisiin hyödyntää monikerrosliimalevyn ydinrakenteissa. Opinnäytetyössä keskityttiin tutkimaan puumateriaalin kosteuden vaikutusta liimasauman lujuuteen. Lisäksi tutkittiin, löytyykö puunkosteudelle raja-arvoa, jossa liimasauman lujuusominaisuudet vastaisisivat kuivattujen puiden liimasaumojä.</p> <p>Kierrätysmateriaalin käytön lisääntyessä on alettu pohtia, olisiko kierrätyspuulle muitakin konkreettista käyttökohteita kuin energiantuotanto. Monikerrosliimalevy tarjoaisi tähän potentiaalisen mahdollisuuden. Jos monikerrosliimalevy valmistettaisiin siten, että vain pintalamellit olisivat uutta puhdasta puuta ja ydinrakenne kierrätyspuuta, laskisi se mahdollisesti materiaalin hankintakuluja. Kierrätyspuun kosteus vaihtelee suuresti riippuen siitä, miten se on varastoitu ja mihin vuodenaikaan se on hankittu. Lisäksi puun kuivausprosessin kustannuksia saattaisi olla mahdollista alentaa, jos kierrätyspuumateriaalia ei tarvitsisi kuivata niin paljon.</p> <p>Työ tehtiin Joensuun Tiedepuiston toimeksiantona Lahden Ammattikorkeakoulun tiloissa. Teoriassa käsitellään CLT eli monikerrosliimapuun valmistusta ja rakennetta, sahatavaran kosteutta, valmistuksessa käytettäviä liimoja, puujätteen hyödyntämistä ja CLT-valmistusta koskevia standardeja.</p> <p>Käytännön osuudessa tutkittiin liiman lujuusominaisuuksia ja sitä, kuinka puunkosteus niihin vaikuttaa. Koekappaleet valmistettiin ja testit suoritettiin Lahden Ammattikorkeakoulun puulaboratoriossa. Opinnäytetyön jakautuu teoriaosuuteen ja käytännönoosuuteen.</p>		
Asiasanat CLT, monikerrosliimalevy, kierrätyspuu, liimasauman lujuus, kosteusprosentti		

Abstract

Author(s) Härmä Henrik	Type of publication Bachelor's thesis	Published Spring 2020
	Number of pages 25	
Title of publication The effect of recycling wood moisture in multilayered wood boards structure Effects of moisture on adhesive joint strength		
Name of Degree Bachelor's Thesis in Material Technology		
<p>Abstract</p> <p>The aim of this thesis was to find out how recycled wood could be utilized in the core structures of a multilayer adhesive board. As the thesis progressed, the focus was put more on the effect of the moisture of the wood material on the strength of the adhesive joint, and whether it would be possible to find a point for wood moisture level where the strength properties of the adhesive joint would correspond to those of dried wood. This would potentially reduce the cost of drying.</p> <p>As demand for the use of recycled material is growing, consideration has been put whether there would be other concrete uses for recycled wood other than energy production. A multilayer adhesive board would provide a potential opportunity for this. If the multilayer adhesive board were manufactured with only the surface lamellae being new pure wood and the core recycled wood, the potential material acquisition costs might be reduced. The moisture content of recycled wood varies greatly from where and when it was obtained, so it may also be possible to reduce the cost of drying the wood if the recycled wood material would not need to be dried as much.</p> <p>The work was assigned by the Joensuu Science Park and was made in the Lahti University of Applied Sciences. The theory part deals with standards for the manufacture and construction of CLT, the moisture content of sawn timber, the adhesives used in the manufacture, the recovery of wood waste and the manufacture of CLT.</p> <p>In the practical part, the strength properties of the adhesive were studied and how wood moisture affects them. The specimens were prepared, and the tests were performed at the Lahti University of Applied Sciences wood laboratory.</p>		
<p>Keywords</p> <p>CLT, Multilayer adhesive board, recycled wood, adhesive joint strength, moisture percentage</p>		

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	1
2	RISTIINLIIMAATTU PUU	2
2.1	Ristiinliimatun puun historia	2
2.2	Sahatavara ja kosteus	3
2.3	Monikerrosliimalevy	5
2.4	Liimat.....	6
2.4.1	CLT:n valmistuksessa käytettävät liimat	7
2.4.2	Delaminoituminen ja liimausvirheet.....	9
3	PUUNJÄTTEEN HYÖDYNTÄMINEN.....	12
4	STANDARDIT.....	14
5	KOKEELLINEN OSA	16
5.1	Koekappaleiden valmistelu	16
5.2	Liimasauman lujuuskokeet.....	17
6	TULOSTEN TARKASTELU	18
6.1	Liimalujuus kokeet	18
6.1.1	Yli 50 kosteusprosentin koekappaleet.....	18
6.1.2	39 kosteusprosentin koekappaleet.....	19
6.1.3	12,5 kosteusprosentin koekappaleet.....	20
6.2	Liimalujuuskokeiden yhteenveto	21
7	YHTEENVETO JA KEHITYSEHDOTUKSET	24
	LÄHTEET	26
	LIITTEET	28

1 JOHDANTO

Opinnäytetyön tavoitteena oli tutkia kierrätyspuun käyttömahdollisuuksia monikerrosliima-levyjen ydinrakenteissa. Potentiaalinen monikerrosliimalevy rakentuisi siten, että pintalämmit olisivat puhdasta uutta puuta ja niiden väliin jäävät kerrokset korvattaisiin kierrätyspuulla. Työssä tutkittiin puun kosteusasteen vaikutusta levyjen liimauksessa sekä sitä, olisiko mahdollista liimata levyt hieman korkeammissa puun kosteusasteissa. Tavoitteena oli saavuttaa vastaavia lujuusominaisuuksia kuin kuivasta puusta liimatuilla levyillä. Kierrätyspuun kosteusasteiden ollessa hyvinkin vaihtelevia, mahdollistuisi tuotantokustannusten alentaminen, jos monikerrosliimalevyt voitaisiin liimata kosteammistakin puusta.

Tutkimuksessa käytetty kierrätyspuumateriaali saatiin Puumerkki Oy:n Lahden yksiköltä. Koekappaleiden valmistus ja testit suoritettiin Lahden Ammattikorkeakoulun puulaboratoriossa. Testilaitteena käytettiin Shimadzu-aineenkoeistulaitetta.

Teoriaosuudessa käsitellään ristiinliimatun puun valmistusta ja historiaa, käytettäviä liimoja, liimausvirheitä, puunjätteen hyödyntämistä sekä standardeja, joita ristiinliimatun puun valmistuksessa seurataan. Käytännön osuudessa käsitellään puunkosteuden vaikutusta liimasaumojen lujuuksiin sekä tätä käsitteleviä testejä ja tuloksia.

Kierrätysmateriaalien kysyntä on ollut viime vuosina suuressa nousussa. Kierrätyspuu on yksi materiaalivaihtoehto, jolle voitaisiin tulevaisuudessa kehittää uusia innovatiivisia käyttökohteita. Nykyään kierrätyspuu menee pääasiallisesti energiantuotannon käyttöön. Jos kustannukset kierrätyspuun käytölle saataisiin mahdollisimman mataliksi, avautuisi mahdolliset markkinat kierrätyspuutuotteille, jotka eivät tarvitse säännösten mukaista lujuusluokitettua puumateriaalia. Suurimmat kustannukset kierrätyspuun käytölle tällä hetkellä syntyvät materiaalin kuljetuskustannuksista, puun kuivaamisesta sekä mahdollisten epäpuhtauksien, esimerkiksi metallien, poistamisesta.

2 RISTIINLIIMAATTU PUU

2.1 Ristiinliimatun puun historia

Ristiinliimattu puu eli monikerroksinen massiivipuulementti, tuote tunnetaan Suomessa yleisemmin nimillä monikerrosliimalevy tai CLT, eli Cross Laminated Timber. Tässä työssä käytetään vastaisuudessa termiä monikerrosliimalevy. Monikerrosliimalevystä voidaan valmistaa levytuotteiden lisäksi myös seinäelementtejä, joihin ei tarvitse myöhemmin työstää ovi- tai ikkuna-aukkoja. CLT:stä voidaan valmistaa myös hirsiseiniä muistuttavia elementtejä sekä painumattomia hirsiiä.

CLT:n kehitys alkoi 1990-luvulla Keski-Euroopassa, Saksan ja Itävallan alueilla. CLT:n suosio on kasvanut vuosien varrella suuresti asuin- ja julkisrakentamisessa. Tuotteen ekologisuus ja tehokkuus, sekä parantunut markkinointi, ovat vaikuttaneet kasvuun. CLT-elementit ovat helppoja käsitellä ja niiden korkea esivalmistusaste nopeuttaa rakennusten pystytysaikaa. Massiivipuukuranteen hyötyjä rakentamisessa ovat hyvä lämmöneristys, äänieristys sekä kohtalaisen hyvä palonkesto. (Gagnon & Pirvu 2011, s. 1)

Kuormitusta vastaanottavana ja kantavana rakenteena toimiva CLT:tä käytetään yleisesti runkoelementeissä. Siitä on rakennettu siltoja, kerrostaloja, omakotitaloja ja julkisrakennuksia ympäri maailmaa. Tämä on erinomainen osoitus CLT:n monipuolisesta käytettävyydestä ja soveltuvuudesta moniin erilaisiin käyttökohteisiin ja olosuhteisiin. (Sirkka & Pirttinen 2017, s. 59)

CLT-valmistajia on Keski-Euroopassa useita, ja joulukuusta 2014 alettiin myös Suomessa valmistamaan CLT-elementtejä Crosslam Kuhmo Ltd:n toimesta. Muita suomalaisia valmistajia ovat ElementtiSampo, Hoisko CLT Finland sekä CLT-Plant Oy. Suomessa valmistettavat CLT:t ovat lähinnä rakentamiseen tarpeisiin tarkoitettua CLT-elementtejä. Sisustus- ja kalusterakentamiseen soveltuvia monikerroslevyihin erikoistunut Rema Massivholzplattenwerk on itävaltalainen perheyhtiö, joka on valmistanut kyseisiin tarkoituksiin monikerroslevyjä vuodesta 1989 lähtien. (Sirkka & Pirttinen 2017)

CLT:n standardoimiseksi aloitettiin prosessi vuonna 2008 ja vuonna 2015 otettiin käyttöön ensimmäinen eurooppalainen standardi, EN 16351. Standardilla on määritetty CLT:lle valmistus ja rakentaminen, mutta yhtenäinen valmistusprosessi jäi standardista uupumaan. CLT:n suunnitteluprosesseja ei ole vielä sisälletty Eurokoodi 5 -Puurakenteiden suunnitteluohejuksiin. (Brander, Flatscher & Ringhofer 2016, s 350)

2.2 Sahatavara ja kosteus

Kuivatun sahatavaran kosteusprosentti voi vaihdella vuodenajan mukaan, mutta on pääsääntöisesti noin 19%:n luokkaa. Sellaisenaan se ei välttämättä sovellu monikerrosliimalevyn valmistukseen, koska osa liimoista tarvitsee kuivempaa puuainesta toimiakseen halutulla tavalla. Suositeltu kosteusprosentti on 12% ($\pm 2\%$), mutta joissain tapauksissa myös voidaan suositella 8% ($\pm 2\%$) kosteutta. Jotta saadaan sisäisten jännitteiden syntyminen minimoitua, tulisi lamellien kosteuspitoisuuden vaihtelun olla mahdollisimman pientä. Puutavaran heikkoudet voidaan poistaa lamellista esimerkiksi poistamalla oksankohdat ja tehdä sormijatkos. Sormijatkokset mahdollistavat hukkaan menevän puuaineksen minimoinnin sekä ovat nopea ja yksinkertainen tapa saada kestävä liitos sen itsekeskittyvän profiilin ansioista. (Gagnon & Pirvu 2011. s10)

Puu on materiaalina hydroskooppinen eli puu kykenee imemään ympäristöstä kosteutta ja luovuttamaan sitä ympäröivään ilmaan. Puumateriaali tasapainottaa oman kosteustensa ympäristönsä suhteellisen kosteuden ja lämpötilan mukaan. Puunsyiden kyllästymispiste on suurin mahdollinen kosteus, jossa vesi on sitoutunut puun soluseinämiin ilman suhteellisen kosteuden ollessa 100%. Syiden kyllästymispiste on kevätpuussa suurempi kuin kesäpuussa. Lylypuun kyllästymispiste on selkeästi normaalipuuta alhaisempi. Puunkosteus ilmoitetaan tavallisesti prosentteina, joka määritetään kaavan 1. mukaisesti:

$$u = \frac{mv}{mu} * 100 \quad \text{Kaava 1}$$

u = kosteusprosentti,

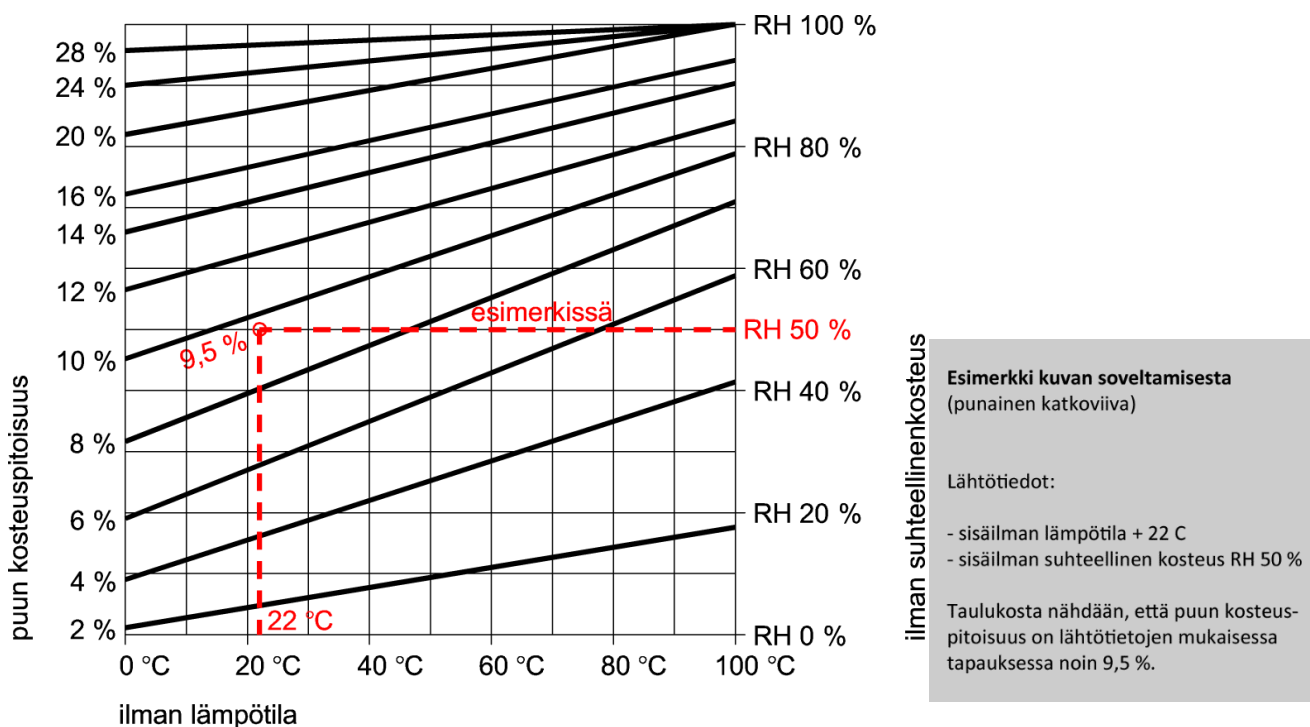
mv = $mu - m_0$,

mu = kostean puun massa,

m_0 = kuivanpuun massa. (Kuikka & Kunelius 1992. s 29)

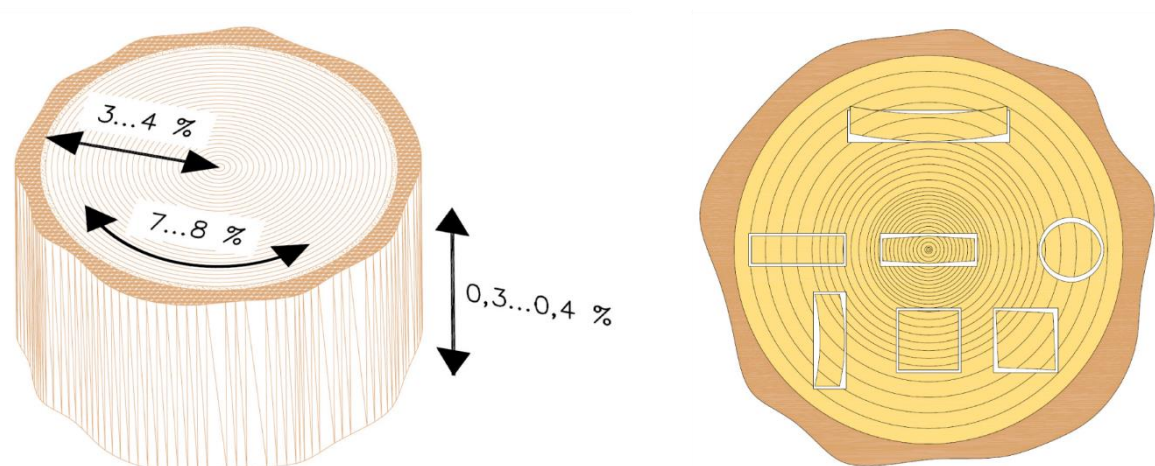
Määritelmän mukaan kosteusprosentti voi ylittää 100%. Puunsisäinen vesimäärä vaihtelee riippuen puun ominaisuuksista ja säilytysolosuhteista. Puun maksimaalinen kosteus riippuu sen tiheydestä. Puuntiheyden ollessa 400kg/m³ on suurin mahdollinen kosteus noin 185%. Tiheyden ollessa 700kg/m³ on suurin mahdollinen kosteus noin 80%. Tarkin tapa määrittää puun kosteusprosentti on tehdä mittaustilanne punnitus-kuivaus -menetelmällä. Puun massa mitataan, mittauksen jälkeen puu kuivataan absoluuttisen kuivaksi ja massa punnitaan uudelleen. Näiden punnitusarvojen pohjalta voidaan laskea kosteusprosentti kaavan 1. mukaisesti. Muita tapoja ovat vastusmittausmenetelmä ja kapasitiivinen menetelmä. Vastusmittausmenetelmässä mitataan puun ohmista vastustusta, joka pienenee suuresti, kun puun kosteusaste kasvaa. Tämä tapa soveltuu mittauksiin tilanteissa, joissa puun

kosteus on alhaisempi kuin puun syiden kyllästymispiste, sillä edellä mainitun pisteen ylittyä on vastus lähes vakio. Vastus- ja kapasitiivisten menetelmien etuna on niiden nopeus verrattuna punnitus-kuivaus -menetelmään eikä erillisiä koekappaleita tarvita. Huonona puolena on, että tulokset eivät ole yhtä tarkkoja verrattuna punnitus-kuivaus -menetelmään. (Kuikka & Kunelius 1992. s 58)



Kuva 3. Puun kosteus taulukko (Puuinfo 2019a; Puuinfo 2019b)

Puun rakenne elää sen kosteusasteen mukaan. Se on voi elää säteen, tangentin ja syiden mukaisesti joko kutistuen tai turvoten. Riippuen puulajista niiden kutistuminen tuoreesta absoluuttisen kuivaksi on syynsuuntaisesti 0,1 - 0,6 %, säteensuuntaisesti 3 - 6 % ja tangentin suuntaisesti 6 - 12 %. Tangentin mukainen eläminen erottuu selkeästi suuremmalla arvolla syyn- ja säteensuuntaiseen kosteuselämiseen. Puuaineen tiheydellä on vaikutus kosteuselämiseen. Tiheyden kasvaessa tilavuuden kutistuminen ja turpoaminen tavallisesti lisääntyy. Sama pätee myös tangentin ja säteen suuntaiseen elämiseen. Syiden suuntainen eläminen sen sijaan vähenee tiheyden kasvaessa monilla puunlajeilla. (Kuikka & Kunelius 1992. s 58)



Kuva 2. Puun kosteuskäyttäytyminen (Puuinfo 2019c)

2.3 Monikerrosliimalevy

Monikerroksinen massiivipuulevy valmistetaan liimaamalla kerroksittain ristiin ladottuja sahatavarankappaleita eli lamelleja. Levyt valmistetaan siten että kerroksia on pariton määrä. Päällekkäin ladottavat liimalevyt asetetaan 90° kulmaan toisiinsa nähden ja liimataan toisiinsa. Tämä tarjoaa korkeat lujuus- ja jäykkyyssominaisuudet tason suuntaisesti ja tasoa kohti molempiin suuntiin. Kerrosten välinen liimaus luo jäykän, yhtenäisesti toimivan, monipuolisen rakenteen. Joissain erikoistilanteissa voidaan päällekkäiset levyt liimata samansuuntaisesti, jolloin saavutetaan erityistilanteita varten tarvittavia rakenteellisia ominaisuuksia. Edelle mainituissa tilanteissa kerroksia on vähintään 5 kappaletta.

Valmistus jakautuu seuraaviin vaiheisiin:

- valmiiksi kuivatun sahatavaran lajittelu
- sormijatkokset; poistetaan sahatavarasta mahdolliset rakennetta heikentävät kohdat
- lamellien jaottelu ja katkaisu määrämittaan
- lamellien höyläys neljältä sivulta
- lamellien liimaus liimapuulevyksi
- liimapuulevyjen tai yksittäisten lamellien ladonta ja liiman levitys

- kerrosten puristaminen hydraulisella-, pneumaattisella- tai alipainepuristimella
- valmiin monikerrosliimalevyn viimeistely; leikkaus, työstöt ja mahdollinen hionta.

Liimapuulevyn valmistus ei ole välttämätön vaihe, vaan lamellit voidaan myös liimata ja latoa sellaisenaan. Laadukkaan monikerrosliimalevyn onnistuminen vaatii sahatavaran laadun yhtenäisyyden ja liimattavuuden vaikuttavien parametrien hallintaa. (Gagnon & Pirvu 2011. s20)

Ennen liimapuulevyn valmistamista lamellit höylätään. Höyläys vähentää lamellin pinnalla olevaa hapettuman määrää ja parantaa lamellin liimattavuutta. Puun kosteuskäyttäytymisen aiheuttama turpoama ja kutistuminen aiheuttavat sisäisiä jännitteitä, minkä vuoksi CLT pintaan muodostuu halkeamia. Jos liimaus on onnistunut, muodostuvat halkeamat lamellisauvojen väliin. Jos CLT puristetaan suoraan lamelleista, tarvitaan puristuksessa lisäksi reunapuristus. Reunapuristuksella saadaan erillään olevat lamellit puristettua syrjiltään yhteen, minimoiden lamellien väliin jäävän raon leveyden. Kun CLT tehdään liimapuulevyistä, ei reunapuristusta tarvita. (Gagnon & Pirvu 2011. s25)

Jos liimapuulevyt ovat tasaisia ja tasapaksuja, ei teoriassa tarvita puristusta ollenkaan vaan levyjen oma massa riittää. Käytännössä pieniä epätasaisuuksia ja laatueroja on aina, joten puristusta tarvitaan. Puristus myös edistää liiman leviämistä liimapinnalle ja helpottaa pinnan kostumista. Tämä parantaa liimaustulosta. Puristuspaine ei kuitenkaan saa olla liian suuri. Liian suuri puristuspaine vahingoittaa puunsolurakennetta. Liian suuri paine voi myös pursuttaa liiman pois saumoista, jolloin tartunta voi jäädä riittämättömäksi. Puulajin valinta vaikuttaa puristuspaineen määrittämiseen. Esimerkiksi kuuselle suositellaan puristuspainetta väliltä 0,4 – 0,6 N/mm². Myös valittu liima vaikuttaa puristuspaineen määrittämiseen. (Gagnon & Pirvu 2011. s30)

2.4 Liimat

Puulevyteollisuudessa käytettävät liimat voidaan jakaa kahteen kategoriaan: kertamuoviliimat ja kestopuoviliimat. Kertamuoviliimoja ovat ureaformaldehydiliimat, fenoliformaldehydiliimat, resorsinoliformaldehydiliimat, polyuretaaniliima ja isosyanaattiliimat. Kestomuoviliimoja ovat PVAC, Polyvinyyliasetaattiliimat ja kontaktiliimat. Tässä tutkimustyössä käytettiin PVAC liimaa koekappaleiden valmistuksessa. (Mäkinen 2017, s 235)

Toinen tapa, jolla liimat voidaan jaotella, on kovettumisreaktion mukaisesti. Esimerkiksi ureaformaldehydi-, fenoliformaldehydi- ja epoksiliimat ovat kemiallisesti kovettuvia, kun taas PVAC ja kontaktiliimat ovat fysikaalisesti kovettuvia. Fysikaalisesti kovettuvissa liimoissa liuotin poistuu liimasaumasta, jolloin liimasta muodostuu kalvo, joka tarttuu liimattaviin pintoihin ja sitoo nämä yhteen. Kemiallisesti kovettuvissa liimoissa syntyvä molekyylien yhteen sitoutuminen ja ketjuuntuminen tapahtuu kemiallisen reaktion johdosta. (Mäkinen 2017, s 235)

Liimauksesta syntyvä liimasauma vaatii onnistuakseen riittävän liiman tunkeutumisen ja kiinnittymisen puuhun. Tätä kutsutaan adheesioksi. Liiman ja liimasauman sisäinen lujuus on puolestaan koheesio. Liiman hyvä tartunta vaatii myös liiman pintajännitteen olevan pienempi kuin liimattavan aineen, jotta liimattava pinta kastuu hyvin. (Mäkinen 2017, s 235)

Liimauskohde	Liimatyyppi							
	Urea-liima	Fenoli-liima	Resorsi-noliliima	Polyure-taani	PVAc-liima	PVAc-+kovete	Sulate-liima	Kontakti-liima
Saumaliimaus	X	X	X		X	X		
Kokoonpano	X				X	X		
Viilutus	X	X	X		X	X		X
Muotopuristus	X	X	X		X	X		
Reunalistoitus	X	X	X		X	X	X	X
Laminointi	X	X	X		X	X		X
Puun jatkaminen	X	X	X		X	X		
Palkit ja kantavat rakenteet			X					
Lastu/puukuitulevy	X	X	X		X	X		
Vaneri	X	X						
Metallin liimaus puuhun	X ⁽¹⁾	X ⁽¹⁾	X ⁽¹⁾	X		X		X

⁽¹⁾ vaatii pohjustuksen

Kuva 3. Liimataulukko (Puuproffa 2019)

2.4.1 CLT:n valmistuksessa käytettävät liimat

Standardi EN 16351 määrittää, että CLT:n valmistuksessa tulee ensisijaisesti käyttää seuraavia liimoja:

- fenoli- ja aminohartsit (MF, MUF, PRF, UF)
- kosteuskovetteiset yksikomponentti polyuretaani liimat (PUR)
- emulsiopolymeeri isosyanaatti liimat (EPI).

Liimojen tulee täyttää EN 15425 tai EN 301 standardien laatuvaatimukset, jotka todistavat liiman soveltuvuuden kantaville puurakenteille. Huonekaluissa käytettävät monikerrosliimalevyjen eivät tarvitse täyttää samoja laatuksiteerejä liimojen suhteen kuin kantavat puurakenteet. Käyttökohde ja olosuhteet määrittävät mitä standardia käytetään, mutta huonekalulevyille ei ole omia standardeja. (EN 16351/ 2015)

Fenoli- ja aminohartseista käytetään pääasiassa resoesinoli- ja resorsinolifenoliliimoja (PRF) sekä melamiiniureaformaldehydiliimoja (MUF). PRF-liimoja käytetään Pohjois-Amerikoissa yleisesti liimapuiden valmistuksessa. PRF- ja MUF-liimat eivät ole kovin yleisessä käytössä CLT valmistuksessa. PRF-liimojen liimasaumat ovat väriltään tummia ja liima kestää hyvin vettä sekä vaihtelevia olosuhteita. MUF-liimojen etuna on hyvä välyksen täyttö ja korkeiden lämpötilojen kesto. Liiman kovettumisreaktiota voidaan nopeuttaa nostamalla lämpötilaa. Formaldehydipohjaisena liimana MUF:n haittapuolena on formaldehydipäästöt. Muina haittapuolina on 1K-liiman rajallinen varastointi ja 2K-liiman tarkka hartsin ja kovettimen sekoitussuhde. PRF- ja MUF -liimat muodostavat korkean ristisiloittumisen takia hauraita liimasaumoja. (Pizzi 2003, s 596; Gagnon & Pirvu 2011, s 26)

Kosteuskovetteisten yksikomponentti polyuretaani liimoja (1K-PUR) suositaan insinööripuutuotteiden valmistuksessa. 1K-PUR liimojen etuna on helppo käsiteltävyys. Lisäksi ne säilyvät pitkään varastossa ja kovettuvat huoneenlämmössä nopeasti, eikä niitä tarvitse yksikomponentti systeemin johdosta sekoittaa. Ne eivät myöskään sisällä liuottimia, haittavia orgaanisia yhdistettä tai formaldehydiä. Liimasaumat 1K-PUR liimoissa ovat joustavia ja väriltään vaaleita, minkä vuoksi ne ovat lähes näkymättömiä. Liima turpoaa kovettuessa, ja sillä on välyksentäyttöominaisuuksia. Havupuiden liimaamiseen 1K-PUR liimat soveltuvat erinomaisesti, mutta soveltuvuudesta lehtipuiden liimaamiseen tarvitaan lisätutkimustietoa. Vesipohjaisten primereiden avulla voidaan parantaa PUR-liimojen liimattavuutta. (Lehringer & Gabriel 2014, s 410)

Liimapuiden valmistukseen tarkoitettuja EPI-liimoja ovat kaksikomponenttisia liimoja, jotka asettuvat nopeasti ja kovettuvat alhaisissakin lämpötiloissa. Kovettumis- ja puristusaikaa voidaan lyhentää radiotaajuuksien avulla. Liimasauma on hyvin kosteuden kestävä ja sieittää korkeita lämpötiloja. Sauma on myös joustava ja väriltään vaalea. Liima on joustava, ja sillä saavutetaan hyvä adheesio ilman primereitä. Tästä johtuen liima soveltuu lehtipuiden sekä puun ja metallin väliseen liimaamiseen. EPI-liima itsessään on formaldehydivaapa, mutta kovetin sisältää kemikaaleja, jotka voivat aiheuttaa allergisia reaktioita. (Lehringer & Gabriel 2014, s 415)

Tässä tutkimustyössä käytettiin polyvinyyliasetaattipohjaista (PVAC) liimaa. PVAC liimoja käytettäessä pitää pinnat puristaa yhteen ja antaa liiman vaikuttaa kunkin liiman

ohjeistuksen mukainen aika, yleisesti noin tunnin ajan. Teollisessa käytössä pystytään puristusaikaa pienentämään 15 minuuttiin asti. PVAC liimat jaotellaan EN 204 standardin mukaisesti luokkiin D1, D2, D3, D4, jotka määrittävät liiman soveltuvuuden kosteissa ympäristöissä. D1 luokan soveltuvuus kosteisiin ympäristöihin on heikoin ja D3 luokka soveltuu yleisesti ulkokäyttöön ja D4 soveltuu vaativiin kosteusolosuhteisiin. D4-liimat ovat yleensä kaksikomponenttisia. Parantaakseen säänkestoa ne vaativat hapon lisäämisen liimaan ennen liimausta. PVAC liimat on yleisliimoja, jotka soveltuvat lähes kaikkiin kuiturakenteisten kappaleiden liimaamiseen. Tämän yleisluontoisuuden takia PVAC liimat eivät sovellu kuitenkaan kantavien puurakenteiden, kuten liimapuupalkkien tai CLT-seinäelementtien, valmistukseen. (Nukkuville 2016)

2.4.2 Delaminoituminen ja liimausvirheet

Delaminoituminen

Puun kosteuseläminen voi aiheuttaa liimasauman delaminoitumisen. Delaminoituminen on ilmiö, jossa puun kutistuminen ja turpoaminen aiheuttavat jännitteitä rakenteeseen. Kyseiset jännitteet voivat johtaa joissakin tilanteissa liimasauman pettämiseen. Toinen osatekijä delaminoitumiselle on liimasauman köyhtyminen. Liimasauman köyhtymisellä tarkoitetaan tilannetta, jossa suurin osa liimasta on pursunut saumasta pois tai liimaa ei ollut levitetty tarpeeksi, jolloin ei muodostu yhtenäistä liimakalvoa kappaleiden välillä. Puulaji, liimanköyhtyminen ja puristusaine ovat kolme pääasiallista syytä liimasaumojen köyhtymiselle. (Frihart 2009)

Liimausvirheet voidaan jakaa kolmeen pääryhmään:

- liimattavan puun vaihtelevista ominaisuuksista johtuvat virheet
- liimasta johtuvat virheet; liimasta johtuvat virheet eivät tavallisesti johdu liiman laadun epätasaisuudesta vaan ovat yleensä varastoinnista, sekoituksesta tai käytöstä johtuvia
- valmistuksen aiheuttamat virheet; suurin syy liimausvirheille on väärät liimausolosuhteet ja -tekniikka sekä käyttötarkoitukseen sopimattoman liiman valinta.

(Kuikka & Kunelius 1992, s 113)

Liiman imeytyminen

Liima saattaa imeytyä liian paljon puuainekseen, jolloin sitä ei jää riittävästi liimasaumaan. Imeytymistä lisää liiallinen puunkosteus tai -kuivuus. Myös liiman viskositeetin alhaisuus

tai liian pieni kuiva-aineenmäärä aiheuttavat liiallista imeytymistä. Kuumapuristuksen alkuvaiheessa kertamuoviliimojen viskositeetti alenee voimakkaasti ennen kovettumisen alkua. Liiallisen imeytymisen välttämiseksi on puu kuivattava tasapainokosteuteen käyttöolosuhteet huomioiden. (Kuikka & Kunelius 1992, s 115)

Paksu liimasauma

Liian paksu liimasauma on lujuudeltaan heikompi kuin ohut ja voi myös aiheuttaa liiman haurastumista. Joskus levitettäessä liimaa joudutaan käyttämään suurempia liimamääriä, kuin olisi välttämätöntä lujuuden kannalta. Syynä voi olla pintojen epätasaisuus, liian suuri viskositeetti tai liian kuiva puu. Liiman avoin ja suljettu liimausaika vaikuttaa myös levitysmäärään. Ajan ollessa pitkä tarvitaan suurempia levitysmääriä kuin lyhyillä liimausajoilla. Lisäksi liiman nopea kovetin aine voi johtaa liian paksuun liimasaumaan. (Kuikka & Kunelius 1992, s 118)

Esikovettuminen ja kuivuminen

Liima voi esikovettua liian aikaisin. Tähän voi olla syynä:

- pitkä liimausaika
- työtilan korkea lämpötila tai kuiva ilma
- pieni liiman levitysmäärä tai epätasainen levitys
- lämmin liimattava pinta tai nopea kovete

Myös liian pitkä liiman avoin aika voi olla syynä ennenaikaiseen kuivumiseen. Ennenaikaisesti voi kovettua tai kuivua liima, joka on sakea tai epätasaisesti sekoitettu. Puun kuivusasteella on merkitystä liiman liian nopeaan kovettumiseen. (Kuikka & Kunelius, 1992 s 120)

Liiman vaillinainen kovettuminen

Vaillinainen kovettuminen voi johtua koveteaineen liian vähäiseksi jääneestä sekoittamisesta tai pienestä määrästä. Vierasaineet puussa, kuten erilaiset kylästeet voivat hidastaa tai jopa estää liiman kovettumisreaktion. Tämä pätee myös alhaiseen kovettumislämpötilaan. (Kuikka & Kunelius 1992, s 125)

Ontot levyt

Ontot levyt saattavat johtua puristuspaineen epätasaisuudesta. Huonosti valmistellut kapaleiden paksuus voi vaihdella levyssä, joka johtaa epätasaiseen puristuspaineeseen. Kuumapuristuksessa yli 100 celsius asteen lämpötila saattaa aiheuttaa kosteuden

höyrystymistä liimasaumaan, joka voi puristinta avattaessa aiheuttaa liimasaumaan aukeamisen. Varsinkin vanerin valmistuksessa liian kosteat viilut voivat aiheuttaa tämän. (Kuikka & Kunelius 1992, s 129)

Muut virheet

Liimauksen aikana voi syntyä jännitteitä, jotka aiheuttavat liimattavissa kappaleissa muodon muutoksia. Niitä voi syntyä erityisesti epäsymmetrisissä rakenteissa, jotka saattavat vääntyillä liimauksen jälkeen. (Kuikka & Kunelius 1992, s 132)

3 PUUNJÄTTEEN HYÖDYNTÄMINEN

Energiatuotannossa kierrätyspuun osuus on erittäin vähäinen. Vuonna 2008 kierrätyspuuta käytettiin energian tuotannossa 735 000 kuutiometriä. Puuraaka-aineesta, jota energia tuotannossa käytetään, kierrätyspuun osuus on vaihdellut 1,4 ja 5 % välillä. Jätteen käsittelyä tarkasteltaessa on tilanne aivan toinen. Vuoden 2007 tilastojen mukaan 12,8 miljoonasta syntyneestä jättepuutonnista kaksi kolmasosaa käsiteltiin polttamalla. Loppu kolmannes on pääosin ensivaiheen jalostuksen sivutuotteita, kuten purua ja muita vastaavia sivujakeita. (Heräjärv, Pirhonen, Rät, Saukkola & Verkasalo 2011, s28.)

Vaneri itsessään tarvitsee valmistukseen puhtaita ja tuoreita raaka-aineita. Vanerin valmistuksessa syntyvät sivujakeet, kuten purilaat, leikkuutähteet ja koepalat, menevät pääasiallisesti energian tuotantoon. Purilaat ovat vaneriviiluja sorvattaessa tukista jäävä sydänosa. Riippuen, onko ne havupuuta tai lehtipuuta, voidaan purilaat hyödyntää myös eri tavalla. Havupurilaat voidaan käyttää kuormalavojen valmistuksessa ja lehtipurilaat voi hyödyntää selluntuotannossa. Valmiille vanerille ei ole itsessään omaa kierrätysjärjestelmää, vaan ne voidaan kierrättää muiden puukappaleiden, puupakkausten ja huonekalujen kanssa. (Heräjärv, ym. 2011, s28.)

Lastulevyn kierrätyksessä pätee sama kuin vaneriinkin. Ne kierrätetään myös puupakkausten ja huonekalujen kierrätysjärjestelmien kautta. Kierrätyspuun käyttöä lastulevyn valmistuksessa on tutkittu, mutta tällä hetkellä teollisuuden tarvitsemia määrien kokoaminen jättepuusta on harvaan asutussa Suomessa liian kallista. Toisena ongelmana on kierrätyspuun mahdollisesti sisältämä metalli. Jotta kierrätyspuut saataisiin puhdistettua, tarvittaisiin neljästä viiteen miljoonan investointi puhdistuslaitokseen. Kansainvälisesti tarkasteltuna on tilanne sama koko Pohjois-Euroopassa. Virossa, Latviassa ja Ruotsissa lastulevyt valmistetaan Suomen lailla puhtaasta puusta. Espanjassa ja Italiassa käytetään pelkästään kierrätyspuuta lastulevyjen valmistuksessa. (Heräjärv, ym. 2011, s28.)

Huonekalujen kierrätyksessä on suuria eroja. Vuonna 2011 yksityistalouksien huonekalut menivät pääsääntöisesti kaatopaikalle saavutettuaan käyttöikänsä päin. Toisaalta on isoja valmistajia, joilla on erittäin kehittyneitä kierrätysjärjestelmiä. Etenkin toimistokalusteiden tuottajat tarjoavat asiakkailleen kierrätysmaksua vastaan vanhojen kalusteiden poisviennin ja kierrätyksen toimittaessaan uudet toimistokalusteet. Vanhat kalusteet toimitetaan yhteistyökumppanina toimivalle kierrätysyritykselle. Vanhat käyttökelpoiset kalusteet kunnostetaan ja myydään eteenpäin. Uudelleen myyntiin kelpaamattomat puretaan ja metallit kierrätetään ja puuosat käytetään pakkausmateriaalina tai laitetaan energiakäyttöön. Parhaimmillaan puolet huonekaluista voidaan kunnostaa ja uudelleen myydä, neljännes hyödynnetään muulla tavoin. Viimeinen neljännes menee raaka-ainekierrätykseen.

Kokonaismäärästä alle prosentti päätyy kaatopaikalle, lähinnä muoviosat. Teollisessa mitakaavassa kierrätyspuun käyttö huonekalujen valmistuksessa ei ole tarpeeksi kustannustehokasta, mutta yksilöllisten desing-huonekalujen valmistuksessa laadukas kierrätyspuu on varsin sovelias vaihtoehto raaka-aineeksi. (Heräjärv, ym. s29.)

Puupakkausten kierrätystä koordinoi Suomessa Puupakkausten Kierrätys PPK oy. Järjestelmään kuuluvat yritykset ottavat vastaan, ostavat, korjaavat ja kierrättävät kuormalavoja ja puupakkauksia. Vuonna 2011 korjausta ja kierrätystä tarjoaviin yrityksiin kuului 35 toimijaa, joista 25 toimi myös vastaanottopisteinä. Vastaanottopisteitä oli yhteensä 75 kappaletta. Pääosa kuormalavoista korjataan ja palautetaan kiertoon takaisin. Korjauskelvottomat haketetaan energiakäyttöön. (Heräjärv, ym. 2011, s29.)

Rakentamisen puujäte kuuluu yleisen jätehuollon piiriin. Puujäte pyritään lajittelemaan syntypaikalla mahdollisimman tehokkaasti, mutta osa puusta päätyy aina lajittelemattoman jätteen joukkoon. Lajittelematon rakennusjätteen kierrätys vaihtelee suuresti Suomen sisällä. Suurimmilla paikkakunnilla toimii teollinen lajittelu, joten kaatopaikalle ei päädy puuta juuri lainkaan. Osalla paikkakunnista lajittelu tapahtuu koneellisesti varastokentällä, jolloin arvioitu kaatopaikalle päätyvä puutavaran määrä on noin prosentin luokkaa lajittelemattoman jätteen kokonaismäärästä. Paikkakunnilla, joissa ei ole lajittelua ollenkaan, on arvioitu kaatopaikalle päätyvän puuaineksen määrä keskimäärin kymmenen prosenttia, vaihtelun ollessa muutamasta prosentista jopa 20 prosenttiin. Kierrätyspuun käyttöä rakentamisessa rajoittaa lainsäädäntö ja hinta. Kantavat rakenteet vaativat säännösten mukaan lujuusluokitettua puuta ja kierrätyspuulle tarvittavan luokituksen hankinta tulisi erittäin kalliiksi. Käyttökelpoisen puumateriaalin talteen ottaminen vaatii myös paljon käsiötä, joka myös nostaa hintaa. Kierrätyspuuta voidaan käyttää lattioihin, sisäverhoiluun ja kohteisiin, jotka eivät vaadi lainmukaista lujuusluokitusta. Jotta kierrätyspuuta käytettäisiin enemmän, tulisi kuluttajien ja arkkitehtien tehdä valintoja. Ilman kysyntää ei ole myöskään tarjontaa. (Heräjärv, ym. 29.)

4 STANDARDIT

Ristiinliimatuille puutuotteille on olemassa Euroopan sisäisiä standardeja. Nämä standardit määrittävät yleiset vaatimukset mitä tuotteiden ominaisuudet kuuluisivat olla. Huonekalujen valmistukseen käytettäville liimalevyille ei ole omia standardeja vaan tässä luvussa käsiteltävät standardit koskevat kantaviin rakenteisiin tulevia liimapuutuotteita.

EN 13017-1, Havupuusta valmistetun liimalevyn pintaluokitukset:

Standardi määrittää yleiset vaatimukset ja ulkonäköluokitukset liimalevyille ja monikerrosliimalevyille, joiden pintakerrosten minimipaksuus on 3,5 mm ja jotka ovat valmistettu pehmeistä puista, kuten kuusi, mänty ja lehtikuusi.

Yleiset vaatimukset:

- Jokainen levyntyyppi on rakenteellisesti symmetrinen koko paksuuden matkalta.
- Kantavissa rakenteissa uloimman kerroksen tulee olla vähintään 5 mm.
- Kaikki uloimman kerroksen lamellit tulee olla samaa puulajia. Poikkeukset ovat määritetty standardissa erikseen.
- Levyjen pinta tulee viimeistellä käyttökohteen mukaan.
- Sisemmällä kerroksilla ei saa olla avonaisia liitoksia, liimattuja tai ilman liimaa. Vähäiset väriviat, laho ja yksittäiset madonreiät ovat sallittuja. (EN 13017-1/ 2000)

EN 13986 + A1, Puulevyt rakennuskäytössä:

Standardilla määritellään puulevyjen käyttö rakentamisessa, levyitä vaadittavat perusominaisuudet ja testausmenetelmät perusominaisuuksien määrittämiseksi puulevyille:

- Sisäkäyttöön kantavissa ja ei-kantavissa rakenteissa kuivissa olosuhteissa.
- Sisäkäyttöön kantavissa ja ei-kantavissa rakenteissa kosteissa olosuhteissa.
- Ulkokäyttöön kantavissa ja ei-kantavissa rakenteissa.

Standardissa esitetään menetelmät, vaatimuksen mukaiselle arvioinnille ja vaatimukset tuotteiden merkinnälle. Standardi kattaa liimapuulevyt, LVL-levyt, vaneri, OSB-

levyt, lastulevyt ja MDF-levyt rakennuskäyttöön. Tätä standardia ei ole tarkoitettu sovellettavaksi tuotteille, joita ei ole tarkoitettu rakennuskäyttöön. (EN 13986 + A1/2015)

EN 14080, Liimapuutuotteet rakennuksissa ja silloissa

Tämä eurooppalainen standardi määrittää vaatimukset seuraaville liimapuutuotteille:

- liimapuu
- liimattu sahatavara
- isoilla sormijatkkeilla jatkettu liimapuu
- monilohkoinen liimapuu.

Edellä mainittuja tuotteita käytetään rakennuksissa ja silloissa. Standardi määrittää tuotteille vähittäisvaatimukset valmistukselle ja arvioinnille. Tätä standardia voidaan soveltaa liimapuussa, joka on valmistettu standardin määrittämistä havupuista tai poppelistä, ja jossa on kaksi tai useampi 6 – 45 mm paksuja lamelleja. (EN 14080/2013)

EN 16351, Puurakenteet CLT

Määrittää suoritusarvot suorille ja kaareville CLT-palkeille kantavissa rakenteissa ilman isoja sormijatkoksia tai niiden kanssa. Standardin mukaisia palkkeja voidaan käyttää kantavissa rakenteissa niin silloissa kuin rakennuksissa. Tämä kyseinen standardi koskee myös homesuojattuja palkkeja. Palosuoja-aineilla käsiteltyjä palkkeja tämä ei koske. (EN 16351/ 2015)

EN 15425 ja EN 301, Liimat kantaville rakenteille

EN 15425 määrittää luokitukset yksikomponentti polyuretaani liimoille, joita käytetään kantaviin rakenteisiin suunnitelluille puutuotteille. EN 301 määrittää luokitukset fenoli liimoille ja aminoplastisille polykondesaation liimoille. Nämä kriteerit koskevat vain liimoja itsessään. Puumateriaalille ja rakenteille on omat standardit. Standardi ei myöskään kata rakennustyömaalla tapahtunutta liimausta, vaan käsittää tehdas tai niiden kaltaisissa olosuhteissa tapahtuneen liimauksen. Nämä standardit ovat lähinnä tarkoitettu liimanvalmistajille. (EN 15425 /2017; EN 301/ 2017)

5 KOKEELLINEN OSA

5.1 Koekappaleiden valmistelu

Kokeellisessa osassa käsitellään koekappaleiden valmistus ja testaukseen liittyvät toimet. Kokeellinen osa suoritettiin silloisen Lahden Ammattikorkeakoulun, nykyisen LAB ammatikorkeakoulun tiloissa. Puumateriaali, jota koekappaleiden valmistamisessa käytettiin, saatiin Puumerkki Oy:n Lahden yksiköltä. Koekappaleissa käytettiin 32x100 PL/VL laadun lautatavaraa, joka oli ollut varastoinnissa liian kauan ja alkanut homehtumaan. Puumerkki Oy kyseisissä tilanteissa, jossa puutavara on mennyt myyntikelvottomaan kuntoon hyödyntää puutavaran pakkausmateriaalina asiakastoimituksissa.

32x100 PL/VL lautatavara, josta koekappaleet valmistettiin, olivat kuljetuksen helpottamiseksi katkaistu noin 90cm mittaisiksi ja niitä oli 12 kappaletta. Nämä 12 lyhyeksi sahattua lautaa, olivat olleet ulkosäilytyksessä ja niiden kosteusprosentti oli tässä vaiheessa noin 50 prosenttia. Lautakappaleet jaettiin kolmeen osaan: neljästä kappaleesta tehtiin koekappaleita sellaisenaan, loput kahdeksan jätettiin kuivumaan Lahden ammattikorkeakoulun puutarvikevarastoon. Näiden kahdeksan lyhyeksi sahattua laudan kuivuttua, neljä työstettiin koekappaleiksi noin 39 kosteusprosentin kohdalla ja loput neljä annettiin kuivua varastossa 12,5 kosteusprosenttiin. Koekappaleiden, joiden kosteusprosentti oli 39 luokkaa, pinnat olivat liimattaessa kuivat ja kosteus oli kappaleiden sisällä. Jokaisesta lautakappaleesta valmistettiin 12 kappaletta koepaloja. Koesarjat numeroitiin siten että ensimmäinen numero kertoo mistä laudasta koekappaleet on tehty. Toinen numero kertoo kosteusprosentin: 1 = 12,5%, 2 = 39%, 3 = 50%. Kolmas numero kertoo, monesko koekappale on kyseessä. Esimerkkinä kolmas lautakappale, kosteusprosentilla 39, koekappale kahdeksan merkittäisiin 3-2-8.

Koekappaleet työstettiin mittaan 25mm x 25mm x 100mm. Liimattava pinta-ala tulisi tällöin olemaan 25mm x 50mm. Valmistuksessa käytettiin Soudal Pro 30D D3 Waterproof PVAC liimaa. Kyseinen liima sopii kosteudenkesto-ominaisuuksiltaan myös ulkoilmassa käytettäviin tuotteisiin. Myöhemmin koekappaleita jouduttiin kaventamaan toisesta päädyistä siten, ettei liimapinta-ala muuttunut. Vetokokeet suoritettiin Shimadzu-aineenkoeistuskoneella. Alkuperäisen suunnitelman mukaiset aseteleuat, joita vetokokeissa käytetään, olivat kadonneet. Tämän vuoksi koekappaleita jouduttiin kaventamaan, jotta kappaleet sopisivat käytössä oleviin aseteleukoihin.

5.2 Liimasauman lujuuskokeet

Kokeellisessa osassa tutkittiin kosteuden vaikutusta liimasauman kestävyYTEEN. On yleisesti tiedossa, että mitä kosteampi kappale on, sitä huonommin liimasauma tulee kestä-mään. Tutkimuksen tarkoitus oli löytää mahdollinen kosteusprosentin raja, jossa moniker-rosliimalevyt voitaisiin liimata, jotta voitaisiin säästää aikaa ja energiaa kierrätyspuun kui-vaamisessa. Jos kierrätyspuuta ei tarvitsisi kuivata puusepänkuivaksi ennen työstämisen aloittamista, voitaisiin saavuttaa säästöjä jatkojalostustuotteiden valmistuksessa.

Liimasauman lujuuskokeet suoritettiin Lahden Ammattikorkeakoulun tiloissa Shimadzu-aineenkoeistusrakenteella ja koekappaleet oli jaettu kosteusprosentin mukaan kolmeen osaan ja lisäksi koesarjan lautasalustan mukaisesti neljään osaan. Ensimmäiseksi kokeet tehtiin 50 kosteusprosentin kappaleille, seuraavana 39 kosteusprosentin kappaleille ja vii-meisenä liimasaumanlujuuskokeet tehtiin 12,5 kosteusprosentin kappaleille. Koekappa-leita vedettiin Shimadzu-aineenkoeistusrakenteella, kunnes liimasauma petti tai vedettävät puukappaleet hajosivat. Viimeisten vetokappalesarjan, eli 12,5 kosteusprosentin koekap-paleet, koeistamisessa meni edellisiä sarjoja enemmän aikaa johtuen Shimadzu- aineen-koeistusrakenteen toimintahäiriöstä, jolloin laitteen Return-toiminto ei toiminut. Return -toi-minto palauttaa koevedoksen jälkeen laitteen asennoinnin lähtötilanteeseen. Kyseisestä häiriöstä johtuen jouduttiin jokaisen koevedoksen jälkeen laite asennoimaan lähtötilantee-seen manuaalisesti.

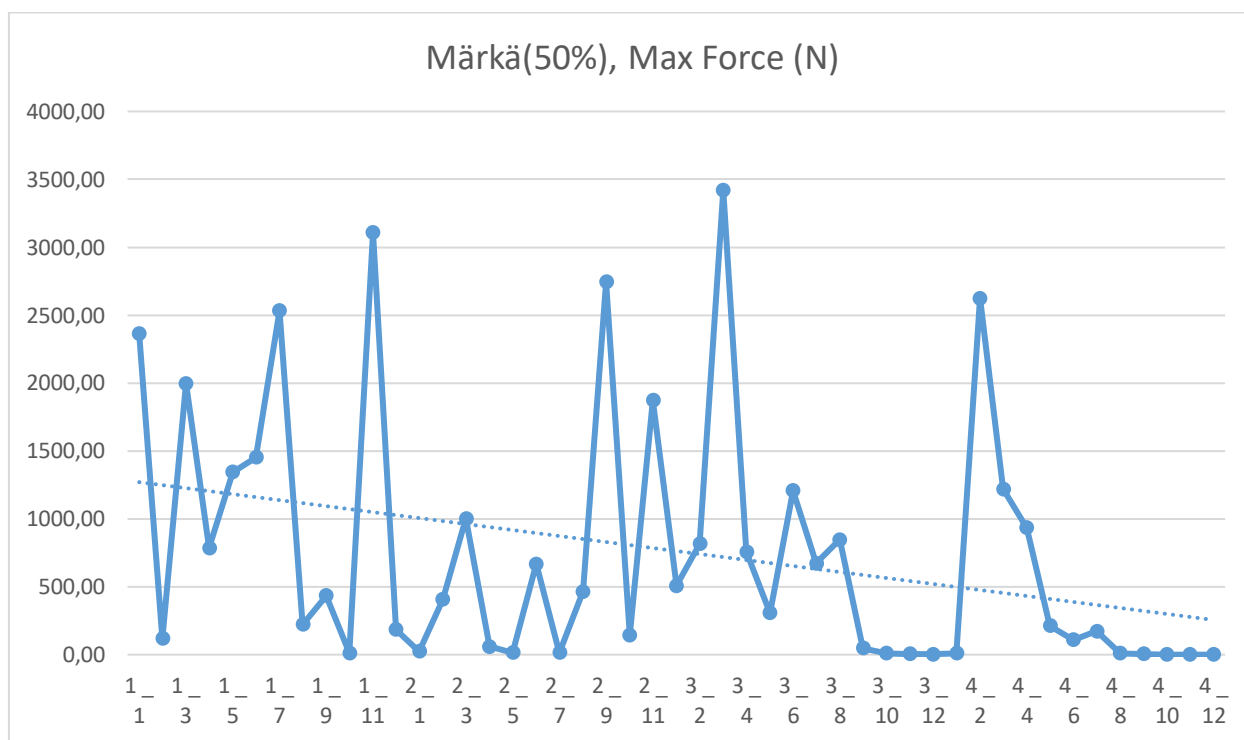
6 TULOSTEN TARKASTELU

6.1 Liimalujuus kokeet

Liimalujuus kokeilla pyrittiin löytämään mahdollinen raja, jossa kosteat kierrätyspuu kappaleet saavuttaisivat liimasaumaltaan vastaavia lujuuksia kuin kuivat kappaleet. Kokeiden tuloksista havaitaan, että kappaleiden kosteus voi tietyissä tilanteissa olla melko korkea ja siitä huolimatta saavuttaa lupaavia tuloksia.

6.1.1 Yli 50 kosteusprosentin koekappaleet

Kuten jo aikaisemmin on todettu, hyvää liimasaumaa ei saada, jos liimattavat kappaleet ovat märkiä. Tämä oli jo huomattavissa ennen vetokokeiden alkamista. Osa liimasaumoista alkoi pettämään ennen kuin vetokoetta voitiin aloittaa.



Kuvio 1. Liimasauman vetokokeet, Märkä (50%), Max Force (N)

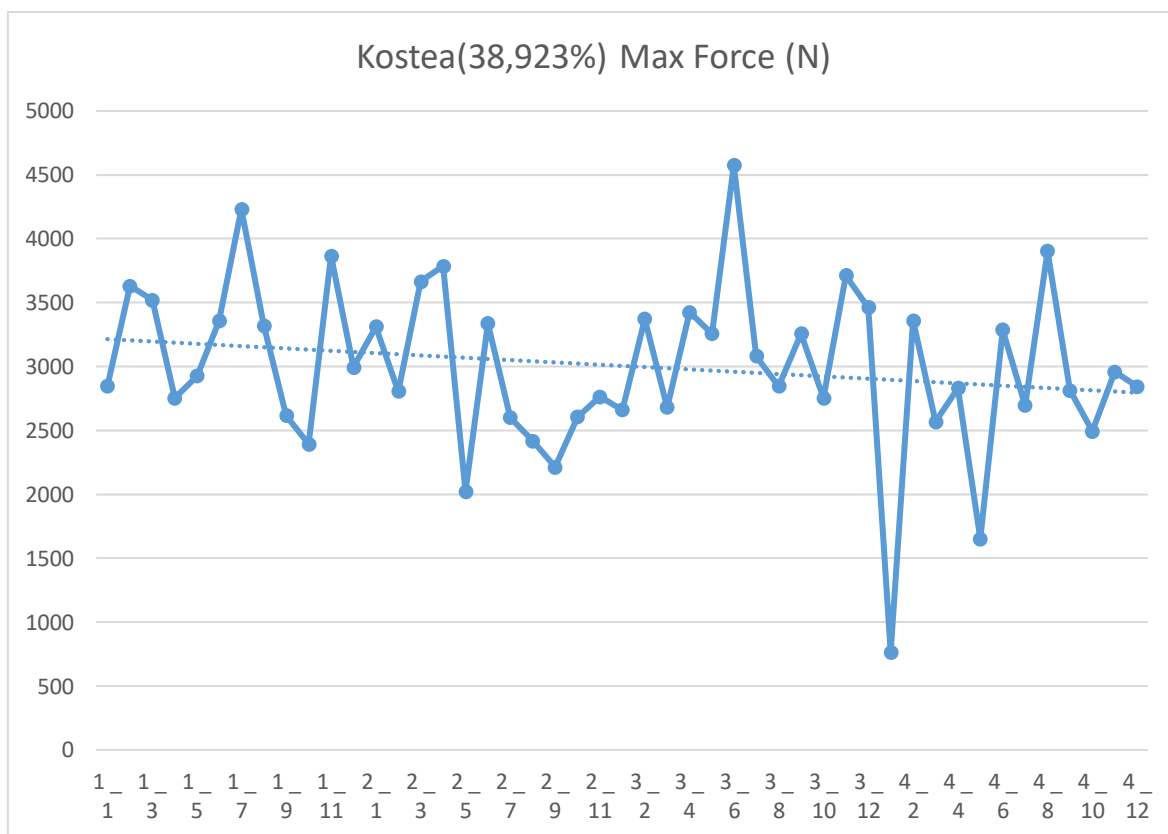
Kaaviosta voidaan nähdä, että tulokseksi saadut arvot vaihtelevat suuresti. Kaikista kappaleista ei edes saatu mittatuloksia, liimasauman ollessa niin heikko, ettei se kestänyt minkäänlaista siihen kohdistuvaa voimaa. Vetokokeista saadut tulokset vaihtelivat suuresti toisistaan. Kuten kuviosta 1 pystytään näkemään, saattoi kahden saman sarjan kappaleen ero tuloksessa olla jopa yli 3000 Newtonia.

Taulukko 1. Liimasauman vetokokeet, Märkä (50%), Max Force (N)

Märkä (50%)	Max Force (N)	
	Keski-arvo	Hajonta
Sarja 1	1212,50	1078,79
Sarja 2	674,43	888,22
Sarja 3	716,15	941,31
Sarja 4	441,41	797,60
Yhteensä	762,97	946,55

6.1.2 39 kosteusprosentin koekappaleet

”Kosteat” koekappaleet olivat ytimeistään silmin havaittavin kosteita. Ennen liiman levittämistä koekappaleet olivat puulaboratorion kuivausuunissa, jotta kappaleiden pinta saataisiin kuivaksi ja valmiiksi liiman levittämiseksi.



Kuvio 2. Liimasauman vetokokeet, Kosteaa (39%) Max Force (N)

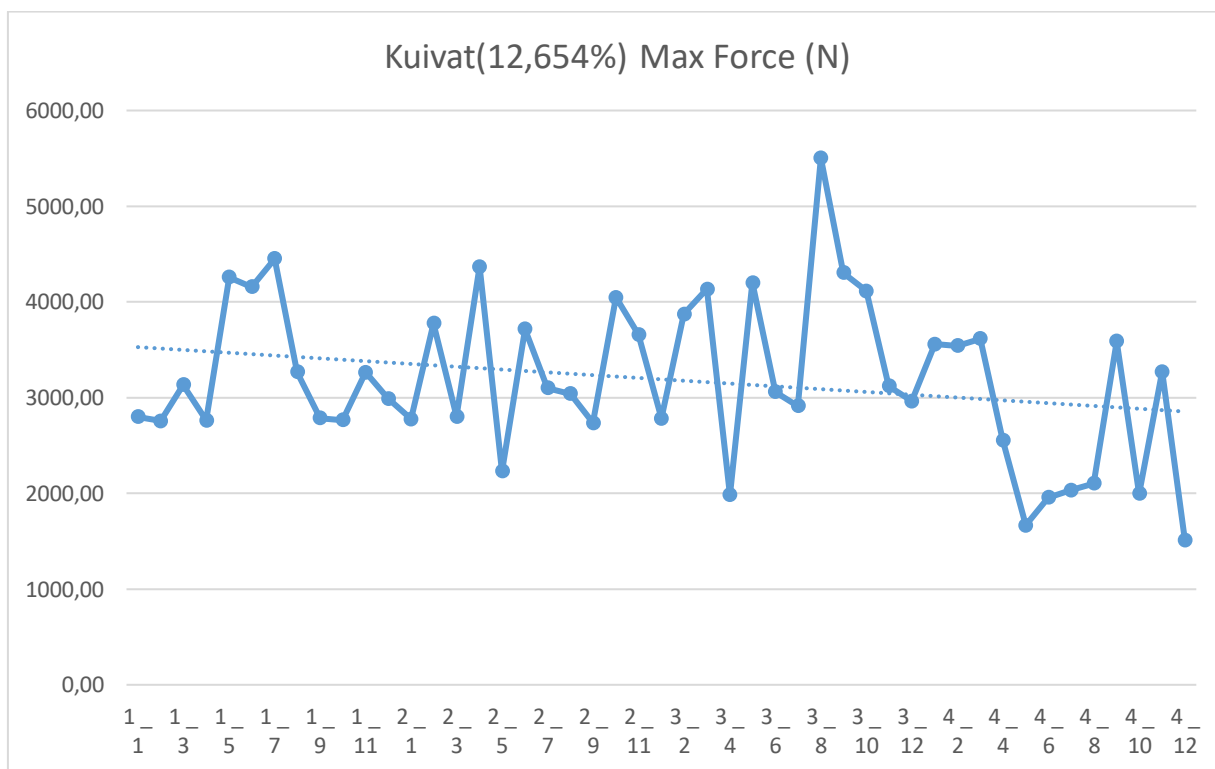
Kuviosta 2 voidaan nähdä tulosten laadun selkeästä paranemisesta. Vetokokeesta saadut arvot ovat pääsääntöisesti yhtä hyviä tai parempia kuin ”märkien” kappaleiden parhaat tulokset, eli 3000 – 3500 Newtonin väliltä. Saatujen tulosten erotkin ovat tasaisia eikä suuria vaihteluita ole juurikaan havaittavissa.

Taulukko 2. Liimasauman vetokokeet, Kosteaa (39%) Max Force (N)

Kosteaa (38,923%)	Max Force (N)	
	Keski-arvo	Hajonta
Sarja 1	3204,17	544,94
Sarja 2	2866,19	582,81
Sarja 3	3256,77	536,81
Sarja 4	2680,99	811,57
Yhteensä	3004,92	655,85

6.1.3 12,5 kosteusprosentin koekappaleet

Viimeisimmät koekappaleet, noin 12,5 kosteusprosentin kappaleet, saivat rauhassa kuivua omalla ajallaan Lahden Ammattikorkeakoulun varastossa tasapainokosteuteen varasto-olosuhteiden mukaiseksi. Nämä arvot toimivat vertailukohteena kahdelle edellä käydylle tuloksille.



Kuvio 3. Liimasauman vetokokeet, Kuiva (12,5%) Max Force (N)

Kuviosta 3 tarkastellessa huomataan, että tulokset pysyvät tasaisesti 3000 – 4000 Newtonin välillä. Myös mittaustulosten vaihtelu on hyvin pientä lukuun ottamatta muutamaa selkeästi heikompaa tulosta. Vetokokeita tehtäessä joidenkin koekappaleiden kohdalla itse puukappale hajosi kohdistuneiden voimien johdosta, mutta itse liimasauma kesti

koevedoksen. Alla olevan taulukosta 3. nähdään että sarjan 4 tulokset olivat selkeästi heikommat kuin kolmen edeltävän sarjan. Sarja 4 alentaa koko koeryhmän keskiarvoa huomattavasti.

Taulukko 3. Liimasauman vetokokeet, Kuiva (12,5%) Max Force (N)

Kuivat (12,654%)	Max Force (N)	
	Keski-arvo	Hajonta
Sarja 1	3282,55	637,80
Sarja 2	3295,46	657,21
Sarja 3	3578,91	942,61
Sarja 4	2616,41	835,00
Yhteensä	3191,16	836,99

Jos tarkastellaan pelkästään kolmea ensimmäistä sarjaa, olisi tulokset taulukko 4. mukaiset. Keskiarvollinen vetovoiman kestävyys nousee vajaaseen 3400 Newtoniin. Kolmen koesarjan tarkastelu tässä tilanteessa lienee järkevämpää. Sarjojen koon ollessa 12 koe-kappaletta saadaan kolmesta koesarjasta 36 vetokokeen otos. Koeryhmän tulos pysyy edelleen vertailukelpoisena. Syyt koesarjan 4:n heikkoihin arvoihin voi olla puumateriaalin sisäiset rakenteelliset heikkoudet tai liimausvirhe, mahdollisesti liian pitkä avoinaika liimalla tai vähäinen liiman määrä.

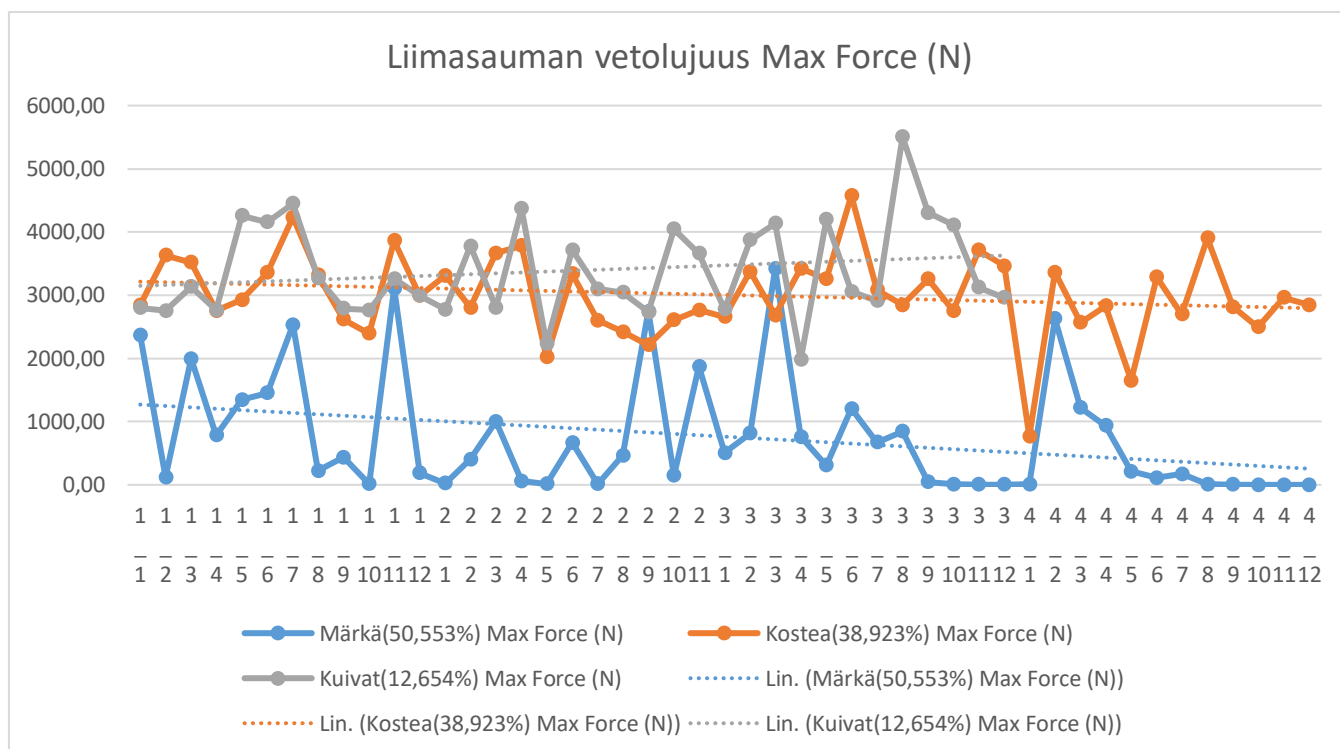
Taulukko 4. Liimasauman vetokokeet, Kuiva (12,5%) Max Force (N) kolmen koesarjan tarkastelu

Kuivat(12,654%)	Max Force (N)	
	Keski-arvo	Hajonta
Sarja 1	3282,55	637,80
Sarja 2	3295,46	657,21
Sarja 3	3578,91	942,61
Yhteensä	3385,64	752,11

6.2 Liimalujuuskokeiden yhteenveto

Seuraavassa luvussa tarkastelemme ja vertailemme liimalujuuskokeiden tuloksia. Tulokset antavat positiivisia viittauksia sille, että energiaa ja aikaa pystyttäisiin mahdollisesti säästämään kierrätyspuun kuivausprosesseissa. Kuten kuviosta 4 voidaan nähdä, erot

12,5 kosteusprosentin ja 39 kosteusprosentin välillä eivät ole kovinkaan suuria. Pintakosteuden kuivaaminen liimattavista kappaleista kuitenkin pitää tehdä, että saavutettaisiin haluttuja lujuusominaisuuksia.



Kuvio 4. Liimasauman vetolujuus Max Force (N)

Kuivien koekappaleiden (12,5%) kohdalla on taulukosta poistettu neljäs vetokoesarja. Edellisessä luvussa mainittiin, että viimeinen vetokoesarja tulokset olivat sen verran heikkoja etteivät niiden tarkastelu olisi relevanttia tutkimuksen kokonaiskuvassa.

Kosteiden(39%) ja Kuivien(12,5%) koekappaleiden arvot asettuvat 2900 – 4000 Newtonin välille, kun Märkien(50%) koekappaleiden arvot vaihtelevat suuresti 0 – 2800 Newtonin välillä.

Taulukko 5. Vertailutaulukko Max Force (N)

Vertailutaulukko	Max Force (N)	
	Keski-arvo	Hajonta
Kuivat (12,654%)	3388,22	752,11
Kosteä (38,923%)	3004,92	655,85
Märkä (50,553%)	762,97	946,55

Taulukosta 5 nähdään, että ero kuivien(12,5%) ja kosteiden(39%) välillä on keskiarvoisesti noin 390 Newtonia. Eroa pystyttäisiin pienentämään jatkamalla kosteiden kappaleiden kuivaamisesta. Näiden tietojen pohjalta voisi arvioida mahdollisen kosteusprosentin, jolla liimalujuusominaisuuksien erolla ei olisi niin suurta merkitystä, olevan jossain 25 prosentin

ja 30 prosentin välillä. Prosenttuaalinen muutos, liimasauman lujuuskokeissa, kuivien (12,5%) ja kosteiden (39%) välillä on 12,76% kun taas kuivien (12,5%) ja märkien (50%) välillä on 344,08%. Jos varastokuivien ja kuivattavien kierrätyspuiden välinen prosenttuaalinen muutos saataisiin alle 10%, voitaisiin mahdollisesti saavuttaa tarvittavat lujuusominaisuudet liimasaumalle ja samalla vähentää kustannuksia kierrätyspuumateriaalin kuivausprosesseista.

7 YHTEENVETO JA KEHITYSEHDOTUKSET

Opinnäytetyön oli osa tutkimusta jonka, tarkoituksena oli tutkia, pystyttäisiinkö kierrätys puuta hyödyntämään raaka-aineena, esimerkiksi puulevyissä, eikä pelkästään energiatuotannossa. Opinnäytetyössä keskityttiin kierrätyspuun kosteuden vaikutuksiin puuta liimattaessa. Kuten testeistä käy ilmi, kierrätyspuun käyttökulujen laskeminen voisi olla mahdollista pienentämällä energiakustannuksia, joita puun kuivaamisesta syntyy. On tietenkin huomioitava, että tämän tutkimustyön tulokset ovat vasta suuntaa antavia. Testeissä käytetyt kosteat koekappaleet olivat ytimeistä vielä märkiä ja pinnat oli saatu kuivaksi pitämällä kappaleita uunissa. Koekappaleiden kosteuden ollessa edelleen korkea olivat kuitenkin tulokset lupaavia, koska liimattavat pinnat olivat kuitenkin kuivat. Noin 39 kosteusprosentin kappaleille saatiin liimasauman vetolujuudeksi keskiarvoisesti 3000 Newtonia, joka oli vain 390 Newtonia vähemmän kuin vertailukappaleet, joiden kosteusprosentti oli 12,5. Muutos, käytetyssä voimassa, kahden vertailtavan erän välillä oli 12,76 prosenttia.

Huomattavimmat erot vetokokeiden tuloksissa oli koekappaleilla, joiden kosteus oli noin 50% luokkaa. Muutamat testikappaleet kestivät suuriakin voimia, kun vastavuoroisesti toisten kappaleiden liimasaumat pettivät jo pienimmästäkin siihen kohdistuneesta voimasta. Kaiken kaikkiaan erot tuloksissa kaikkien koeryhmien sisällä johtuivat mitä oletettavammin liimasaumojen kuivumisesta. Siitä huolimatta, että koekappaleita valmistellessa pyrittiin avoin aika ja liiman määrä pitämään samana kaikkien kappaleiden välillä, eroja muodostui koska liimanlevitys tapahtui käsin. Liimausvirheiden mahdollisuus kasvaa, kun liimaus tapahtuu käsin eikä koneellisesti. Toinen mahdollinen syy eroihin koekappaleiden välillä oli puun, josta koekappaleet valmistettiin, rakenteelliset erot. Osa koekappaleista hajosi siten, että liimasauma säilyi ehjänä. Käytettäessä kierrätyspuuta materiaalina on puumateriaali todennäköisesti vaurioitunut puurakenteita purkaessa tai kuljetuksen aikana. Koekappaleiden kohdalla on mahdolliset vauriot tapahtuneet todennäköisesti kuljetuksen aikana. Myös mahdolliset kasvuvirheet puun kasvaessa voivat vaikuttaa puun rakenteelliseen heikkouteen.

Jatkotutkimuksia ajatellen tulisi testien määrää laajentaa. Tämän tutkimuksen tulosten ollessa suuntaa antavia, tulisi tulevilla testeillä keskittyä löytämään mahdollinen raja puunkosteudelle, jossa liimalujuusominaisuudet olisivat lähes, ellei jopa yhtä hyvät kuin varastokuivalla puumateriaalilla. Tämän tutkimustulosten perusteella arvioisin mahdollisen rajan löytyvän 25 – 30 kosteusprosentin väliltä. Jotta edellä mainittu mahdollinen raja-arvo löydetäisiin, tulisi koesarjojen ja -erien määrää lisätä eri puunkosteuksilla. Tätä raporttia kirjoittaessa havaitsin, että alkuvaiheen suunnittelussa olisi pitänyt päättää tarkemmin tutkittavat kosteusprosentti rajat ja koeryhmien määrät. Lopputuloksen kannalta koeryhmän,

jonka kosteusprosentti oli noin 50, tulokset eivät juurikaan antaneet mitään uutta ja hyödyllistä tietoa vaan tarjosi lähinnä näkökulman, miksi puumateriaali tulee kuivata ennen käyttöä. Kyseisen koeryhmän kappaleet olisi voitu kuivata esimerkiksi 25 – 30 kosteusprosentin välille. Huolellisemmalla suunnittelulla ja ennakkoon pohtimalla mahdollisia tuloksia tutkimussuunnitelmaa tehdessä, olisi tämäkin voitu mahdollisesti ennakoida ja valmistella koeryhmät sen mukaisesti. Tulevissa tutkimuksissa olisi myös hyvä tehdä kokeita käyttäen eri liimoja. Eri liimat reagoivat kosteuteen eri tavoilla. Joitain liimoja voidaan käyttää vaikka liimattava kappale olisikin kostea. Tällaisessa tilanteessa on tietenkin otettava huomioon syntyvät lisäkustannukset. PVAC-liimojen ollessa edullinen vaihtoehto puun liimaamiselle, tulisi myös arvioida mahdolliset hyödyt ja haitat, jos käytettävä liima vaihdetaan.

LÄHTEET

Painetut lähteet:

Gagnon, S. & Pirvu, C. 2011. CLT Handbook. Canadian edition. Quebec: FPInnovations.

Kuikka, K. & Kunelius, K. 1992. Puutekniikan Materiaalit 2. Helsinki: Otava Oy.

Lehringer, C. & Gabriel, J. 2014. Review of Recent Research Activities on One-Component PUR-Adhesives for Engineered Wood Products. Dordrecht: Springer

Mäkinen, T. 2017. Puulevyteollisuus. Porvoo: Bookwell Oy.

EN-301, 2017. Adhesives, phenolic and aminoplastic for load-bearing timber structures – Classification and performance requirements. Bryssel. European Committee for Standardization.

EN-13017-1, 2000. Solid wood panels - Classification by surface appearance - Part 1: Softwood. Bryssel. European Committee for Standardization.

EN-13986 + A1, 2015. Wood-based panels for use in construction - Characteristics, evaluation of conformity and marking. Bryssel. European Committee for Standardization.

EN-14080, 2013. Timber structures – Glued laminated timber and glued solid timber - Requirements. Bryssel. European Committee for Standardization.

EN-15425, 2017. Adhesives - One component polyurethane (PUR) for load-bearing timber structures – Classification and performance requirements. Bryssel. European Committee for Standardization.

EN-16351, 2015. Timber structures - Cross laminated timber – Requirements. Bryssel. European Committee for Standardization.

Sähköiset lähteet:

Brander, R., Flatscher, G. & Ringhofer, A. 2016. Cross Laminated Timber – Overview and development [viitattu 17.11.2019]. Saatavissa: <https://doi.org/10.1007/s00107-015-0999-5>

Heräjärvi, H., Pirhonen, I., Rätty, T., Saukkola P. & Verkasalo E. 2011. Puutuotteiden kierrätys: Finnish Wood Research Oy:n osarahoittaman esiselvityshankkeen loppuraportti. Metla [viitattu 19.1.2020]. Saatavissa: <http://www.metla.fi/julkaisut/workingpapers/2011/mwp191.pdf>

Puuinfo 2019a. Kosteus [viitattu 25.11.2019]. Saatavissa: <https://www.puuinfo.fi/sites/default/files/kosteus.png>

Puuinfo 2019b. Kosteus esimerkki [viitattu 25.11.2019]. Saatavissa:

https://www.puuinfo.fi/sites/default/files/kosteus_esimerkki.png

Puuinfo 2019c. Kosteusteknisiä ominaisuuksia [viitattu 25.11.2019]. Saatavissa:

<https://www.puuinfo.fi/puutieto/puu-materiaalina/kosteusteknisi%C3%A4-ominaisuuksia>

Puuinfo 2019d. Puun kosteuskäyttäytyminen [viitattu 25.11.2019]. Saatavissa:

https://www.puuinfo.fi/sites/default/files/puun_kosteuskayttaytyminen-1_0.png

Puuproffa 2019. Liiman valinta – Puun liimaus [viitattu 15.1.2020]. Saatavissa:

<https://puuproffa.fi/puutieto/puun-liimaus/valinta/>

Sirkka, A. & Pirttinen, V. 2017. CLT –monipuolinen, nopea ja ekologinen ra-

kennusmateriaali. Lapin ammattikorkeakoulu. Sarja B. [viitattu 17.11.2019]. Saatavissa:

<https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/123601/B%203%202017%20Sirkka%20Pirttinen.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Nukkuville 2016. Puuliiman valinta [viitattu 15.1.2020] Saatavissa:

<https://nukkuville.fi/liiman->

[valintaa/?fbclid=IwAR3XjHT39rwgkw9L4i68OKM6kW_IdMK2aQEIBAqBIRA9A6UlrxTLa6HVpLk](https://nukkuville.fi/liiman-valintaa/?fbclid=IwAR3XjHT39rwgkw9L4i68OKM6kW_IdMK2aQEIBAqBIRA9A6UlrxTLa6HVpLk)

LIITTEET

LIITE 1.

	Kuivat(12,654%)	Kostea(38,923%)	Märkä(50,553%)
Koekappaleet	Max Force (N)	Max Force (N)	Max Force (N)
1_1	2800,00	2846,88	2362,50
1_2	2756,25	3631,25	118,75
1_3	3134,38	3518,75	1996,88
1_4	2762,50	2753,13	784,38
1_5	4256,25	2925	1343,75
1_6	4156,25	3356,25	1453,13
1_7	4450,00	4231,25	2531,25
1_8	3268,75	3318,75	221,88
1_9	2787,50	2615,63	434,38
1_10	2765,63	2393,75	12,50
1_11	3262,50	3865,63	3106,25
1_12	2990,63	2993,75	184,38
2_1	2775,00	3312,5	25,00
2_2	3775,00	2806,25	406,25
2_3	2803,13	3665,63	1003,13
2_4	4368,75	3784,38	59,38
2_5	2231,25	2021,88	15,63
2_6	3715,63	3337,5	668,75
2_7	3100,00	2600	15,63
2_8	3040,63	2418,75	465,63
2_9	2734,38	2212,5	2743,75
2_10	4046,88	2606,25	143,75
2_11	3659,38	2762,5	1871,88
3_1	2781,25	2659,38	506,25
3_2	3871,88	3371,88	815,63
3_3	4134,38	2681,25	3418,75
3_4	1984,38	3425	756,25
3_5	4200,00	3256,25	306,25
3_6	3059,38	4575	1206,25
3_7	2912,50	3081,25	671,88
3_8	5503,13	2846,88	846,88
3_9	4303,13	3256,25	46,88
3_10	4112,50	2753,13	9,38
3_11	3121,88	3712,5	6,25
3_12	2962,50	3462,5	3,13
4_1	3559,38	765,625	9,38
4_2	3540,63	3359,38	2625,00
4_3	3615,63	2568,75	1218,75
4_4	2556,25	2831,25	934,38
4_5	1665,63	1650	212,50
4_6	1956,25	3287,5	109,38
4_7	2034,38	2696,88	171,88
4_8	2103,13	3903,13	9,38
4_9	3587,50	2812,5	6,25
4_10	1996,88	2493,75	0,00
4_11	3271,88	2959,38	0,00
4_12	1509,38	2843,75	0,00

Mittaus arvot Max Force(N), kaikki testatut kappaleet.

LIITE 2.

	Kuivat(12,654%)	Kostea(38,923%)	Märkä(50,553%)
Koekappaleet	Max Stress (N/mm2)	Max Stress (N/mm2)	Max Stress (N/mm2)
1_1	2,240	2,278	1,890
1_2	2,205	2,905	0,095
1_3	2,508	2,815	1,598
1_4	2,210	2,203	0,628
1_5	3,405	2,340	1,075
1_6	3,325	2,685	1,163
1_7	3,560	3,385	2,025
1_8	2,615	2,655	0,178
1_9	2,230	2,093	0,348
1_10	2,213	1,915	0,010
1_11	2,610	3,093	2,485
1_12	2,393	2,395	0,148
2_1	2,220	2,650	0,020
2_2	3,020	2,245	0,325
2_3	2,243	2,933	0,803
2_4	3,495	3,028	0,048
2_5	1,785	1,618	0,013
2_6	2,973	2,670	0,535
2_7	2,480	2,080	0,013
2_8	2,433	1,935	0,373
2_9	2,188	1,770	2,195
2_10	3,238	2,085	0,115
2_11	2,928	2,210	1,498
3_1	2,225	2,128	0,405
3_2	3,098	2,698	0,653
3_3	3,308	2,145	2,735
3_4	1,588	2,740	0,605
3_5	3,360	2,605	0,245
3_6	2,448	3,660	0,965
3_7	2,330	2,465	0,538
3_8	4,403	2,278	0,678
3_9	3,443	2,605	0,038
3_10	3,290	2,203	0,008
3_11	2,498	2,970	0,005
3_12	2,370	2,770	0,003
4_1	2,848	0,613	0,008
4_2	2,833	2,688	2,100
4_3	2,893	2,055	0,975
4_4	2,045	2,265	0,748
4_5	1,333	1,320	0,170
4_6	1,565	2,630	0,088
4_7	1,628	2,158	0,138
4_8	1,683	3,123	0,008
4_9	2,870	2,250	0,005
4_10	1,598	1,995	0,000
4_11	2,618	2,368	0,000
4_12	1,208	2,275	0,000

Mittaus arvot Max Stress (N/mm²), Kaikki testatut kappaleet.